

基于电子式电流互感器的采样值差动保护研究

姜雅飞¹, 缪盛泽²

(1. 南通航运职业技术学院 轮机工程系, 江苏 南通 226010; 2. 南京林业大学 机械电子工程学院, 江苏 南京 210037)

摘 要: 采样值差动保护原理的保护装置可以直接利用电子式电流互感器的数字化输出的采样数据, 加快保护出口跳闸, 简化保护配置。采样值电流差动保护优于传统电流差动保护制动效果的条件是: 必须在半个周期中有大于 1/4 周波的角度范围满足动作判别方程, 即 $S > N/4$ 。电子式电流互感器采样频率会影响采样值差动保护动作, 采样频率越高, 在复平面上采样值差动保护动作的模糊区就越小, 保护装置的动作可靠性就越高。

关键词: 电子式互感器; 采样值差动保护; 采样算法

中图分类号: TM452

文献标识码: A

文章编号: 1671-9891(2018)02-0053-05

0 引言

根据传变测量的不同, 互感器可以分为电压互感器和电流互感器。与传统电磁式互感器相比, 电子式互感器绝缘结构简单、体积小、质量小、线性度好, 电流互感器动态响应范围宽, 电压互感器无谐振现象。目前应用在差动保护中的信息量主要是基于电流量, 故本文以电子式电流互感器为研究对象, 开展基于电子式电流互感器的差动保护研究。^[1-2]

1 电子式电流互感器应用在采样值差动保护中的优越性

电子式电流互感器(ECT)采用了利用磁光或电光效应的光电互感器、独立式空心线圈(Rogowski 线圈)传感器或低功率电流互感器的半常规电流传感器。电子式电流互感器应用在采样值差动保护中具有两大优越性。首先, 无饱和问题。电子式电流互感器从原理上避免了铁芯因一次大电流而出现饱和, 导致二次侧电流出现波形畸变。由于 ECT 动态范围宽, 线性度好, 其测量精度可以满足故障暂态过程中采样值差动保护的要求, 有利于加快采样值差动保护的動作速度, 提高保护的速动性。其次, 数字化输出, 简化保护配置。传统的电流互感器只有模拟量输出, 采样需要在保护装置中进行, 保护装置需要配备低通滤波和采样环节。ECT 兼具模拟量输出和数字量输出的功能, 其模拟量输出为 22.5~225 mV(保护用)。因此, ECT 数字输出的电流采样值可以直接进入差动保护装置或者由以太网发送到保护装置, 进而利用采样值差动保护原理快速地对故障做出准确的判断, 加快保护出口跳闸, 同时也简化了保护配置。

2 采样值差动保护的基本原理

采样值差动保护利用采样瞬时值来实现基于基尔霍夫定律的差动保护, 与常规的相量差动保护不同的是, 通过计算一定数据窗得到的电流相量在稳态条件下是不变的。采样值差动保护对每一个采样时刻的采样瞬时值进行判别, 在连续 R 次判别中如有 S 次满足采样值差动保护判据, 则输出动作信号。^[3] 采样值差动保护中的制动量和动作量均随时间而变化, 对于每一时刻的采样点, 采样值差动保护的制动特性关系都不一样。为保证在区外故障时保护不误动, 同时又不影响被保护设备内部短路时保护能正确地快速动作, 采用连续 R 次采样判别中有 S 次及以上满足动作条件, 才输出动作信号, 其具体判据如式(1)所示。

$$\begin{cases} i_d(k) \geq i_{d0} \\ i_d(k) \geq k_{res} \cdot i_r(k) \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2018-01-16

基金项目: 江苏高校品牌专业建设工程资助项目(LJPP6-15)

作者简介: 姜雅飞(1983—), 男, 江苏南通人, 南通航运职业技术学院轮机工程系实验师。

式中 i_{d0} 为最小启动电流 k 为采样时刻 k_{res} 为制动系数,以双端(M、N 端)电流差动为例,动作电流 i_d 如式(2)所示。

$$i_d(k) = |i_M(k) + i_N(k)| \quad (2)$$

上式中 i_M 和 i_N 为电流互感器引入差动回路的二次侧电流。与常规相量差动保护的制动电流选取类似,采样值差动保护的制动电流 i_r 定义如式(3)所示。

$$i_r(k) = \frac{1}{2} |i_M(k) - i_N(k)| \quad (3)$$

采样值差动保护动作的原则是:在一定的采样率下,当连续判别 R 次,有 S 次满足式(2)时,保护输出动作信号。为使区外故障时采样值差动保护不误动 S 、 R 选取应遵循:保证区外故障时采样值差动保护制动性能等于或优于常规相量差动保护的原则,以下主要就和差制动方式对采样值差动保护的动作性能进行具体分析。

3 采样值差动保护动作性能分析

当制动电流选取如式(1)所示时,采样值差动保护判据如式(4)所示。

$$\begin{cases} |i_M(k) - i_N(k)| \geq i_{d0} \\ |i_M(k) - i_N(k)| \geq \frac{k_{res}}{2} |i_M(k) + i_N(k)| \end{cases} \quad (4)$$

设差动保护中两侧 ECT 的电流 i_M i_N 的相位相差为 φ ,由于 ECT 不存在饱和效应,故区外故障时认为 i_M i_N 幅值相等,综合各种稳态和暂态因素,两侧相位差最大变化范围为 $120^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$ i_M 、 i_N 的计算分别如式(5)、式(6)所示。

$$i_M(t) = \sqrt{2} I \sin(\omega t) = \sqrt{2} I \sin(\theta) \quad (5)$$

$$i_N(t) = \sqrt{2} I \sin(\omega t - \varphi) = \sqrt{2} I \sin(\theta - \varphi) \quad (6)$$

将上式代入到式(3)、式(4)中得到采样值差动保护中的动作电流和制动电流,分别如式(7)、式(8)所示。

$$i_d = |2\sqrt{2} I \cos(\varphi/2) \sin(\theta - \varphi/2)| \quad (7)$$

$$i_r = |2\sqrt{2} I \sin(\varphi/2) \cos(\theta - \varphi/2)| \quad (8)$$

其各个电流之间的关系如图 1 所示。制动比关系如式(9)所示。^[4]

$$n_{res} = \frac{i_d}{i_r} = \left| \frac{2\cos(\varphi/2)\sin(\theta - \varphi/2)}{\sin(\varphi/2)\cos(\theta - \varphi/2)} \right| \quad (9)$$

同理可以得到常规相量电流差动保护的制动比,如式(10)所示。

$$n_{res}' = \left| \frac{2\cos(\varphi/2)}{\sin(\varphi/2)} \right| \quad (10)$$

为保证差动保护区外故障时采样值差动保护制动性能等于或优于常规相量差动保护,那么必须有足够的采样点数的制动比满足式(11)。

$$n_{res}' \geq n_{res} \quad (11)$$

即可得式(12)。

$$\left| \frac{2\cos(\varphi/2)\sin(\theta - \varphi/2)}{\sin(\varphi/2)\cos(\theta - \varphi/2)} \right| \geq \left| \frac{2\cos(\varphi/2)}{\sin(\varphi/2)} \right| \quad (12)$$

取临界情况,即取等号,求解上式得式(13)。

$$|\tan(\theta - \varphi/2)| = 1 \quad (13)$$

上式中 i_d 和 i_r 的周期为 π ,在 $\varphi/2 \leq \theta \leq \pi + \varphi/2$ 时,有式(14)成立。

$$\begin{cases} \theta_1 = \varphi/2 + \pi/4 \\ \theta_2 = \varphi/2 + 3\pi/4 \end{cases} \quad (14)$$

当 $\theta_1 \leq \theta_2 \leq \theta_3$ 时,采样值差动保护的制动效果低于常规相量电流差动保护的制动效果,其大小如式(15)

所示。

$$\varphi = \theta_2 - \theta_1 = \pi/2 \quad (15)$$

和差制动动作特性如图1所示。它与相位差 φ 无关, 设每周波采样点数为 N , 为保证在区外故障时采样值差动保护制动性能等于或优于常规相量差动保护, 则采样值差动 S 的选取应满足式(16)的条件。^[5]

$$S > \frac{\varphi}{180^\circ} \times \frac{N}{2} = \frac{N}{4} \quad (16)$$

采样值差动保护中 R 、 S 的选取须满足如下关系, 如式(17)所示。^[6]

$$R \geq S + 2 \quad (17)$$

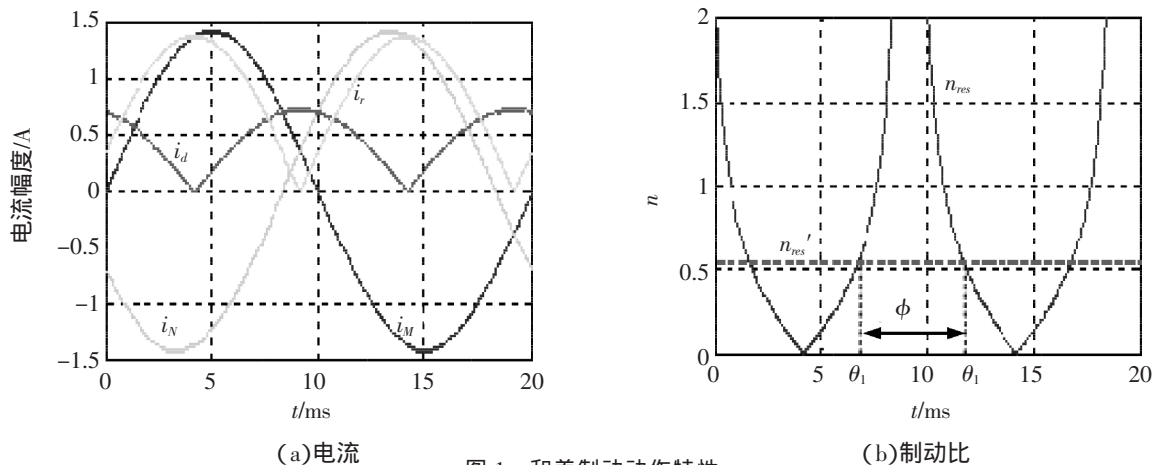


图1 和差制动动作特性

4 采样频率对采样值差动保护的影响

电子式电流互感器具有一次部分的体积小, 安装位置灵活的特点, 往往会集成在气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)内部或安装在断路器和变压器套管上, 由GIS、断路器、变压器的一次设备制造商供货。IEC60044-8标准规定ECT的额定采样频率可取为1000 Hz、2400 Hz和4000 Hz(对于50 Hz工频系统), 因此在同一个数字化变电站内往往由于一次设备供货商的不同, 存在着各ECT的额定输出数据采样频率并不完全一致的情况, 而基于采样值差动保护需要比较同一时刻的采样瞬时值, 故需要实现采样频率归一化。

对基于和差制动的采样值电流差动保护判据进行分析可知, 由于电流数据采样的离散性和采样初始时刻的不确定性导致采样瞬时值电流差动保护动作值存在模糊区, 即采样值差动保护的動作边界是变化的。

模糊区的上下限定义为: 当电流差动的有效值大于模糊区上限值时, 采样值差动保护将不受采样初始时刻影响而必定动作; 模糊区下限为当电流差动有效值小于模糊区下限值时, 采样值差动保护将不再受采样初始时刻影响而必定不动作; 模糊区的大小与 R 、 S 和每周波采样点数 N 有关, 即和采样频率有关。根据式(5)的特点, 可以分别写作如下两个判据:

$$|A \sin \theta| \geq I_0 \quad (18)$$

$$|A \sin \theta| \geq |B \sin(\theta - \varphi)| \quad (19)$$

式中 A 、 B 为电流幅值, φ 为两侧电流相角差。

第一, 以 $R=S=2$ 为例, 对于(19)的判据一, 图2(a)给出了動作模糊区的上限, 在连续的 R 次判别中, 只要有连续的 S 次判别满足判据, 则保护输出動作信号。换言之, 当连续 R 次判别中, 有3点不满足判据, 则保护不动作。即当第 k 点过零, 而第 $(k+1)$ 和第 $(k-1)$ 点处于临界動作时, 为保护模糊区的上限。因为只要 i_d 的幅值略为减小就会出现3个点不动, 保护不动作; i_d 的幅值略为增加, 不动点就只会有1个, 保证判据動作, 这是一种临界状态, 因此有式(20)成立。

$$A_{\max} = \frac{I_0}{\sin(\frac{2\pi}{N})} \quad (20)$$

当 $i_d > A_{\max}$ 时, 采样值差动保护将不受采样初始时刻的影响, 必定動作。

图 2(b)给出了动作模糊区的下限,当过零点位于第 k 与 $(k+1)$ 个采样点中间,且第 $(k-1)$ 与 $(k+2)$ 个采样点正处于临界动作时,其差流为模糊区下限,因此有式(21)成立。

$$A_{\min} = \frac{I_0}{\sin(\frac{3\pi}{N})} \quad (21)$$

模糊区如式(22)所示。

$$A \in [A_{\min}, A_{\max}] = \left[I_0 / \sin(\frac{3\pi}{N}), I_0 / \sin(\frac{2\pi}{N}) \right] \quad (22)$$

模糊比的计算如式(23)所示。

$$\rho = A_{\min} / A_{\max} = \frac{\sin(2\pi/N)}{\sin(3\pi/N)} \quad (23)$$

可见,随着采样频率的升高,模糊比在减小,即模糊区间减小。

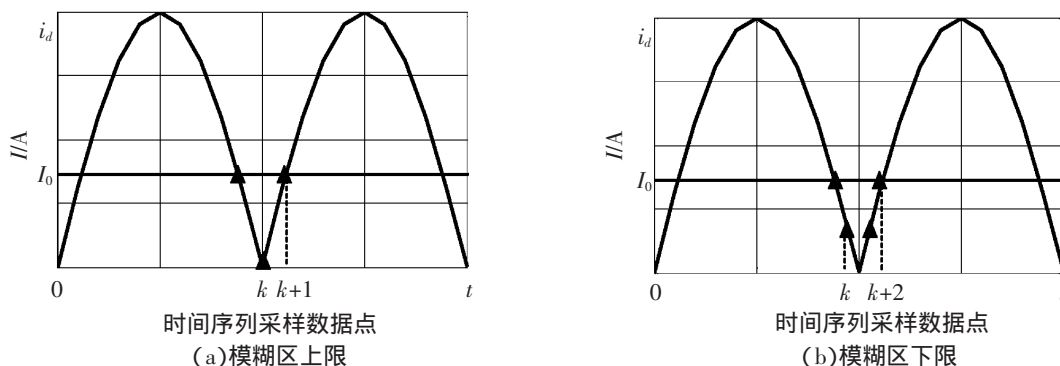


图 2 $R=S+2$ 动作模糊区上下限

第二,对于式(20)所示的判据二,因为 $|A \sin \theta|$ 和 $|B \sin(\theta - \varphi)|$ 都是以 π 为周期的,故可以在一个周期内作讨论,如图 3 所示,即 $0 \leq \varphi \leq \pi, 0 \leq \theta \leq \pi$ 时,来研究动作模糊区的范围。当 $\varphi = 0$ 或 $\varphi = \pi$ 时,只要 $A \geq B$,则判据二始终成立,此时采样值差动保护不存在动作模糊区。

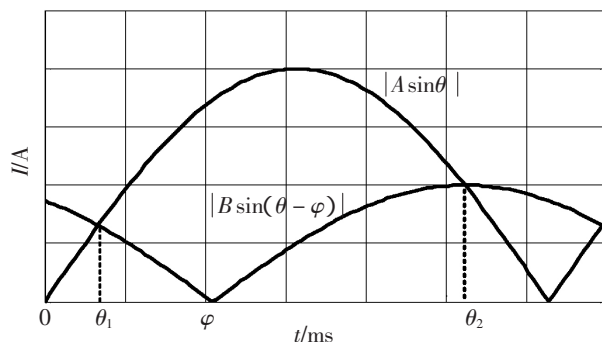


图 3 动作量和制动量之间的关系

当 $0 < \varphi < \pi$ 时,有:

$$\text{当 } 0 \leq \theta \leq \pi \text{ 时 } A \sin \theta = -B \sin(\theta - \varphi) \quad (24)$$

$$\text{即 } \cot \theta_1 = \frac{A + B \cos \varphi}{B \sin \varphi} \quad (25)$$

$$\text{当 } \varphi \leq \theta \leq \pi \text{ 时 } A \sin \theta = B \sin(\theta - \varphi) \quad (26)$$

$$\text{即 } \cot \theta_2 = \frac{-A + B \cos \varphi}{B \sin \varphi} \quad (27)$$

由于刚好有 S 个采样点满足判据二的角度范围为

$$\theta_2 - \theta_1 = (S - 1 + k) \frac{2\pi}{N} \quad (28)$$

由式(26)–式(28)可以求出式(29)。

$$\frac{A}{B} = \frac{-\sin\varphi}{\tan[(S-1+k)2\pi/N]} \pm \frac{\sqrt{\sin^2\varphi + \tan^2[(S-1+k)2\pi/N]}}{\tan[(S-1+k)2\pi/N]} \quad (29)$$

上式中, $0 \leq k \leq 1$, 当 $(S-1+k)2\pi/N$ 时取“+”, 当 $\pi/2 < (S-1+k)/N < \pi$ 时取“-”。

当 S 取不同值, 可以求出刚好有 S 个点满足判据时, 动作电流、制动电流与制动系数的比在动作的模糊区变化。当 $S \leq N/4$, 即 $(S-1+k)2\pi/N < \pi/2$ 时, 有式(30)成立。

$$\frac{A}{B} \in \left[\frac{-\sin\varphi + \sqrt{\sin^2\varphi + \tan^2[(S-1)2\pi/N]}}{\tan[(S-1)2\pi/N]}, \frac{-\sin\varphi + \sqrt{\sin^2\varphi + \tan^2[S \cdot 2\pi/N]}}{\tan[S \cdot 2\pi/N]} \right] \quad (30)$$

当 $S > N/4$, 即 $\pi/2 < (S-1+k)2\pi/N < \pi$ 时, 有式(31)成立。

$$\frac{A}{B} \in \left[\frac{-\sin\varphi - \sqrt{\sin^2\varphi + \tan^2[(S-1)2\pi/N]}}{\tan[(S-1)2\pi/N]}, \frac{-\sin\varphi - \sqrt{\sin^2\varphi + \tan^2[S \cdot 2\pi/N]}}{\tan[S \cdot 2\pi/N]} \right] \quad (31)$$

模糊区间的大小与采样频率有关, 每周波采样点数 N 越大, 模糊区间越小, N 越小模糊区间越大。因此, 提高电流的采样速率, 能够减小采样值差动保护动作的模糊区间, 当采样速率无穷大时, 模糊区间接近零。

5 结束语

通过分析基于电子式电流互感器的采样值差动保护原理, 可以发现采样值电流差动保护优于传统电流差动保护制动效果的条件是: 必须在半个周期中有大于 $1/4$ 周波的角度范围满足动作判别方程, 即 $S > N/4$ 。根据不同的采样频率对采样值差动保护动作性能的影响, 可以有效提高采样值差动保护动作的可靠性。

参考文献:

- [1]孙一民, 李延新, 黎强. 分阶段实现数字化变电站系统的工程方案[J]. 电力系统自动化, 2017, (5): 90–93.
- [2]陈德树, 马天皓, 刘沛, 等. 采样值电流差动微机保护的一些问题[J]. 电力自动化设备, 2016, (4): 3–7.
- [3]杨经超. 巨型水轮发电机故障暂态仿真及发变组保护研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- [4]王涛, 李红斌, 陈金玲, 等. 数字积分器在电子式电流互感器中的应用[J]. 电气应用, 2016, (5): 96–98.
- [5]杨经超, 尹项根, 陈德树. 采样值差动保护动作特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, (9): 71–77.
- [6]张可畏, 王宁, 段雄英, 等. 用于电子式电流互感器的数字积分器[J]. 中国电机工程学报, 2014, (12): 104–107.

(责任编辑: 顾力豪)

Research on Differential Protection of Sampled Value Based on Electronic Current Transformer

JIANG Ya-fei¹, MIAO Sheng-ze²

(1. Dept. of Marine Engineering, Nantong Vocational & Technical Shipping College, Nantong 226010, China;

2. School of Mechanical Electronics Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: The protective device based on differential protection principle of sampled value can directly utilize digital sampling data output from an electronic current transformer to accelerate protection of outlet tripping and simplify protection configuration. The condition that the sampled value current differential protection is superior to the traditional one in braking effect is that angular range greater than $1/4$ of the cycle must be satisfied in half cycle, i.e., $S > N/4$. The sampling frequency of the electronic current transformer affects the differential protection of the sampled value. The higher the sampling frequency is, the smaller the blurred area of the differential protection on complex plane will be, and the higher the operational reliability of the protection device will be.

Key words: electronic transformer; sampled value differential protection; sampling algorithm